食品冷链能效评估与碳排放核算研究综述

王　想，邹金桂，李　由，孙　韵，张小栓*

（中国农业大学工学院食品质量与安全北京实验室，北京 100083）

摘　要：能效评估与碳排放核算可为食品冷链节能减排策略的制定提供理论工具和实践支持，同时也是实现食品冷链可持续发展的先决条件。本文首先阐述了一般食品冷链中能耗与碳排放的关系，以及太阳能值、标准煤和等效电3种能耗折算标准的原理及应用，并对食品冷链各环节能源消耗情况进行了分析。在此基础上，从宏观能效、微观能效、能源经济、环境能效、综合能效5个方面提出了10个能效指标，构建了食品冷链能效评估指标体系，并综述了其他能效评估指标和方法。此外，本文还介绍了碳排放折算标准，重点对中国电力碳排放因子作了论述，并回顾了排放因子法、生命周期评价法、投入产出法，以及混合生命周期评价法4种碳排放核算方法的由来、原理以及优缺点等，以及生命周期评价法在食品冷链碳足迹计算中的基本流程，并提出了食品冷链节能减排策略。最后，对食品冷链的能效评估与碳排放核算进行了简要展望，以期为推动中国食品冷链的可持续发展提供借鉴。

关键词：食品冷链；能耗折算；能耗分析；能效评估；碳排放；冷链节能减排；智慧供应链

中图分类号：X322；F203　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**SA202301007

引用格式：王想, 邹金桂, 李由, 孙韵, 张小栓. 食品冷链能效评估与碳排放核算研究综述[J]. 智慧农业(中英文), 2023, 5(1): 1-21.

WANG Xiang, ZOU Jingui, LI You, SUN Yun, ZHANG Xiaoshuan. Review on energy efficiency assessment and carbon emission accounting of food cold chain[J]. Smart Agriculture, 2023, 5(1): 1-21.

1　引　言

据联合国环境规划署（United Nations Environment Programme，UNEP）估计，2019年全球粮食损失或浪费量达到了9.31亿吨，约占全球粮食生产总量的17%[1]。2019年联合国粮食及农业组织（Food and Agriculture Organization of the United Nations，FAO）数据则显示，从收获后到零售前，全球每年约有14%的食品被损失[2]。浪费的大量粮食资源增加了无效温室气体排放，在被填埋处置时也会向大气排放大量的二氧化碳和甲烷等。因此，减少食品在供应链上的质量损失对于降低冷链碳排放尤为关键。研究表明，降低食品温度可以有效减缓化学和生物降解，在适当的温度条件下储存、运输易腐烂食品，可延缓食品新鲜度的下降和降低质量损失，让消费者获得更高品质的食品[3,4]。因此，在食品供应链中，合理的温湿度条件是保障食品质量安全的关键，而冷链就是保证合理温湿度条件的关键。

国家标准《物流术语》（GB/T 18354-2021）将冷链定义为：根据物品特性，从生产到消费的过程中使物品始终处于保持其品质所需温度环境的物流技术与组织系统。《“十四五”冷链物流发展规划》将冷链物流解释为：利用温控、保鲜等技术工艺和冷库、冷藏车、冷藏箱等设施设备，确保冷链产品在初加工、储存、运输、流通加工、销售、配送等全过程始终处于规定温度环境下的专业物流。Sarr等[5]根据FAO 2017年的数据估计，增加发展中国家冷藏设备设施的数量，缩小世界各地在制冷技术

收稿日期：2023-01-10

基金项目：欧盟“转化亚洲”项目EU Switch Asia （ACA/2021/428-472）

作者简介：王　想，博士，讲师，研究方向为物联网与农业信息化。E-mail：wxzrjj@cau.edu.cn

*通信作者：张小栓，博士，教授，研究方向为智慧农业、智能传感与工业工程。E-mail：zhxshuan@cau.edu.cn

使用上的差距，从而改善全球冷链条件，进而可节约5.26亿吨粮食（约占全球粮食总生产量的11.6%）。因此，冷链是在不增加产量的情况下改善粮食供应和质量的可持续方式[6]。此外，冷链还一直被国际制冷学会和全球冷链联盟等组织长期推广[7]。为此，为了保持食品的固有特性，食品供应链迫切需要制冷技术的投入。

但全球食品冷链供应系统也消耗了大量的能源，对自然环境产生的影响也不可忽视。制冷活动消耗了全球约15%的电力[8,9]，用于食品生产和供应的能源消耗达到了全球总能源使用量的15%～20%[10]。主要食品冷链活动的制冷剂泄漏和能源消耗产生的总排放量约占全球温室气体排放量的1%～3.5%，其中70%～80%来自能源消耗[9]。此外，在冷链物流中，电力主要由化石燃料驱动的发动机来提供，而随着全球煤炭、石油储量的紧缩，冷链的能源成本也在逐年上升。因此，尽管需要增加能源的投入和使用来满足人们快速增长的高质高量的食物需求，但同时也应考虑冷链能耗过高、能效较低、化石燃料枯竭、食品质量损失严重以及碳排放过量等问题。

作为应对全球变暖和能源危机的有效途径[11]，绿色低碳冷链发展模式不仅是经济与社会发展的客观要求，也是冷链物流发展的必然选择。《2030年可持续发展议程》中可持续发展目标12.3呼吁：到2030年，将零售和消费环节的全球人均粮食浪费减半，并减少生产和供应环节粮食损失，包括收获后的损失。2020年9月，习近平总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话中首次提出，中国力争要在2030年前实现碳达峰，努力争取2060年前实现碳中和。这是中国为应对气候变化，实现可持续发展以及深入推进生态文明建设所作出的重大战略决策。《关于加快建立统一规范的碳排放统计核算体系实施方案》指出，碳排放统计核算是做好“双碳”工作的重要基础，是制定政策、推动工作、开展考核、谈判履约等的重要依据。同时还强调要加快建立健全覆盖全面、算法科学的行业碳排放核算方法体系以及重点产品碳排放的核算方法。

此外，全球变暖的趋势增长了人们对各种制冷的需求，从而加剧温室气体的排放，导致恶性循环。因此，食品冷链节能减排行动刻不容缓，但必须下好能效评估与碳排放核算这一“先手棋”，为冷链相关人员提供理论依据和数据支持。

基于上述背景，本文介绍了食品冷链能效评估与碳排放核算中可参考的能耗、碳排放折算标准，从而可统一能耗和碳排放单位。然后，对食品冷链各环节能源消耗情况进行了分析，在此基础上，从5个方面提出了10个能效指标，构建了食品冷链能效评估指标体系。接着，归纳了近年来可应用于食品冷链能效评估与碳排放核算的模型与方法，并简述了生命周期评价法在食品冷链碳足迹核算中的基本流程。最后，提出了食品冷链节能减排方法，以期为制定针对产品层面的能效评估标准、碳核算标准、政策等做好铺垫，并为食品冷链及其他行业的可持续发展提供参考依据。

2　食品冷链中的能耗与碳排放

食品冷链各环节消耗了各种能源，相应地，也产生了一定的直接或间接温室气体排放。消耗的能源可以通过太阳能值、标准煤、等效电等折算标准折算为综合能耗，而各类温室气体排放可先利用全球变暖潜能值（Global Warming Potential，GWP）转换为二氧化碳当量，然后再采用如排放因子法、生命周期评价法、投入产出法以及混合生命周期评价法等碳排放核算方法计算冷链总的碳排放，具体机理如图1所示，实际冷链中，各环节可适当增减。

食品冷链中能耗与碳排放之间并非完全为线性关系，减少能耗的同时可能会增加碳排放量，增加能耗的同时也有可能会降低碳排放量。能耗与碳排放核算方法相似，但也有所区别。综合能耗计算需按食品冷链各环节各能源消耗量折标后再汇总。在获得各能源消耗量信息的基础上，才能再根据能源碳排放因子继续进行碳排放核算，最后对各环节碳排放量进行汇总。所以，能耗计算是碳排放核算的基础。二者的区别就是核算边界有所不同，能耗计算包括可再生能源，如太阳能、水能、风能以及生物质能等，而碳排放核算并不包括清洁的可再生能源，因为它们很少或不产生碳排放。因此，能耗分析与碳排放核算既相互联系又相互区别，一种策

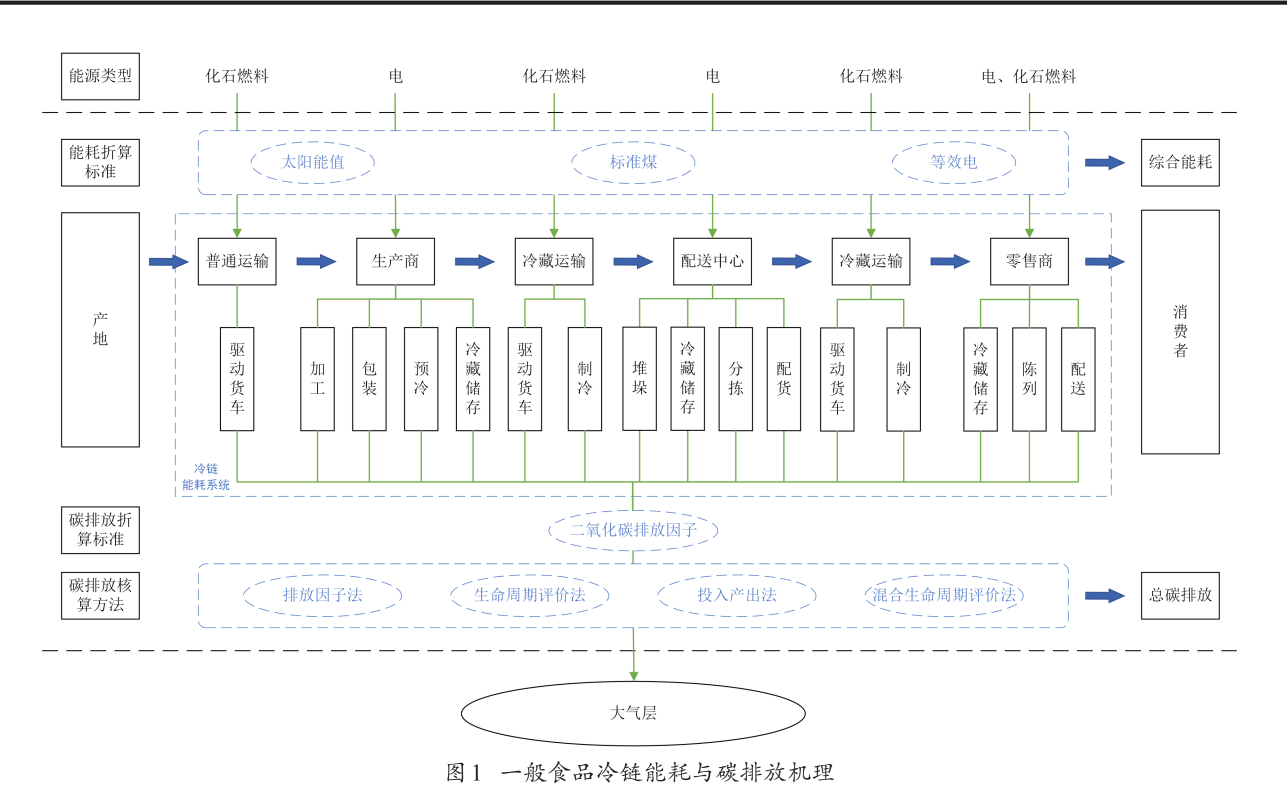


图 1　一般食品冷链能耗与碳排放机理

Fig. 1　Energy consumption and carbon emission mechanism of general food cold chain

略、措施往往可以达到既节能又减排的目的。

3　能耗分析与能效评估

能源是人类赖以生存和发展的物质基础，能源消耗被认为是表征任何产品或过程的重要参数。能源效率是环境、经济和社会发展的关键资源[12]，减少能源消耗是环境保护和经济发展的最有效战略之一，也是社会可持续发展的题中应有之义。适宜的能效评估工具可将食品、经济与环境问题相结合，并作为可持续性管理的重要手段。

3.1 能耗折算标准

食品冷链在各环节会产生不同的资源消耗，有化石燃料、电能这一类能源消耗，也有包装材料、机械材料、气体等资源消耗，还有劳动力的消耗。但对食品冷链进行能耗分析时，一般只将能源消耗作为研究对象，而不考虑其他资源消耗，从而简化分析过程。不同能源间有着本质和价值的差异，所以在进行综合能耗计算时，不能对各种能耗进行简单加减和比较分析。因此，首先需要使用同一种能耗折算标准将各种能耗统一为一个单位，从而再计算食品冷链的综合能耗，进而评估冷链的能效水平。太阳能值、标准煤、等效电这三种折算标准在食品冷链的能耗分析与能效评估中具有较大应用潜力，其中，标准煤的应用已经十分广泛。

3.1.1　太阳能值

能值（Emergy）的定义为一种流动或储存的能量中包含的另一种能量的数量。每种资源、产品或劳务形成所需的直接和间接投入使用的太阳能的量，就是其所具有的太阳能值[13, 14]。这一理论由美国著名生态学家Odum提出并加以改进，克服了传统能量分析法中不同类别能量难以统一为同一能量的问题，形成了能够准确评估环境资源价值的科学指标体系。

不同能量具有不同的能级和能质，相互之间可通过能值转换率（Emergy Transformity）实现转换[15]。能值转换率为单位能量或物质所具有的能值，即等级位置的能量度[13]。实际应用的是太阳能值转换率，即单位能量或物质由多少太阳能焦耳的能值转化而来，并且能值转换率越高，该能质越高，在能量系统中的等级越高。因此，能值转换率可作为能耗折算的一种标准应用到食品冷链中。此外，能值转换率一般是在已有研究基础上选定的，所以能值转换率会因生产技术水平和生产过程的不

同而有所差异，在选取能值转换率时也应尽量遵循“先高频后低频，先国内后国外，先近期后远期”的原则[16]。

能值理论在农业领域有着广泛的研究和应用，但大多偏向于生产系统、农牧系统、养殖系统、种植系统等，而关于食品供应链以及食品冷链的能值理论研究尚未见文献报道。为此，将能值分析法应用于食品冷链能耗研究中的潜力巨大。食品冷链中消耗的主要资源有柴油、电力、农机产品、包装材料以及劳动力等，其主要折能系数和能值转换率如表1和表2所示。其中折能系数用于间接计算太阳能值。为此，食品冷链综合能耗即可折算为太阳能的总热量值，即各资源消耗量与各资源能值转换率的乘积之和。

表1 食品冷链主要折能系数

Table 1 Main energy conversion coefficient in food cold chain

名称	折能系数	来源
柴油/($MJ\cdot L^{-1}$)	56.31	[17]
电力/（$MJ\cdot kWh^{-1}$）	10.59	[17]
劳力/($kJ\cdot d^{-1}$)	12,600	[18]
农机产品/（$kJ\cdot kg^{-1}$）	2.092×10^5	[19]

表2 食品冷链主要能值转换率

Table 2 Main emergy transformity in food cold chain

名称	能值转换率	来源
太阳能/($sej\cdot J^{-1}$)	1	[20]
柴油/($sej\cdot J^{-1}$)	1.11×10^5	[20]
电力/($sej\cdot J^{-1}$)	2.21×10^5	[21]
农业机械/($sej\cdot J^{-1}$)	7.50×10^7	[19]
劳力/($sej\cdot J^{-1}$)	3.80×10^5	[19]
美元/($sej\cdot dollar^{-1}$)	4.94×10^{12}	[18,22]
人民币/($sej\cdot yuan^{-1}$)	6.92×10^{11}	

注：按1美元=7.14人民币汇率折算

3.1.2 标准煤

国际上通常采用的标准燃料有：油当量、电当量、热功当量（焦耳）和煤当量等。中国能源结构以煤为主，因此常采用标准煤来作为能耗的统一计量单位[23]。《综合能耗计算通则》（GB/T 2589-2020）中将折标准煤系数定义为“能源单位实物量或者生产单位耗能工质所消耗能源的实物量，折算为标准煤的数量”，可通过其将各类能源或耗能工质的消耗量折算为标准煤耗。

近十几年来，折标准煤系数在产品生产、采矿以及发电供电等领域的应用较为广泛。食品冷链中主要消耗的能源包括电力、柴油、汽油等，主要耗能工质包括氧气、氮气、二氧化碳以及新水等，它们折标准煤系数如表3所示。此外，在实际计算时，应考虑实际上年制备耗能工质设备效率等影响因素，对耗能工质的折标准煤系数进行修正。

表3 食品冷链中主要折标准煤系数(参考值)

Table 3 Main standard coal coefficient in food cold chain (reference value)

能源名称/耗能工质名称	平均低位发热量/($kJ\cdot kg^{-1}$)	单位耗能工质耗能量	折标准煤系数	来源
汽油	43,124	——	1.4714 kgce/kg	[24]
柴油	42,705	——	1.4570 kgce/kg	[24,25]
电力(等价值)	——	——	0.2870 kgce/kWh	[26]
氧气	——	11.72 MJ/m^3	0.4000 kgce/m^3	[24]
氮气	——	19.68 MJ/m^3	0.6714 kgce/m^3	[24]
二氧化碳气	——	6.28 MJ/m^3	0.2143 kgce/m^3	[24]
新水	——	7.54 MJ/t	0.2571 kgce/t	[24]

注：表中汽油、柴油、电力为能源，对应平均低位发热量；氧气、氮气、二氧化碳气以及新水为耗能工质，对应单位耗能工质耗能量。此处耗能工质的单位耗能工质耗能量和折标准煤系数是按照电厂发电标准煤耗为0.404 kgce/(kW·h）计算所得。而电力（等价值）折标准煤系数则根据中国2020年6000 kW及以上电厂燃煤发电标准煤耗算得

虽然《综合能耗计算通则》为广大能源管理相关人员提供了参考，但在实际应用时，其中的综合能耗计算公式以及折标准煤系数仍存在一些局限，如能源消耗存在明显的重复计算、“当量热值”与“等价热值”存在混用等。为此，在计算实际综合能耗时，应当考虑输出能源的实物量以及根据实际

需求对原综合能耗公式和折标准煤系数进行修正等。

3.1.3 等效电

能源有一次能源和二次能源、高品位能源和低品位能源之分，在传统综合能耗计算和能效评估中，有时也会忽略各种能源间品位的差别。在大量实例与分析下，江亿和杨秀[27]基于“能质系数”[28]概念提出的“等效电法”，能提高能源输送、转换等各环节损耗的透明性，对于能源统计、评估分析等工作也具有较强的实用价值。其基本原理是根据各种能源的最大电力转换能力，将能源统一转换为与之等效的电力，然后按照电力来进行综合能耗计算，具体计算方法见公式（1），而能源的能质系数可根据其能源的品位高低和做功能力大小来确定，如公式（2）[27]。

$$Q_e = \eta \cdot Q \quad (1)$$

$$\eta = 1 - \frac{T_0}{T_1 - T_0} \ln \frac{T_1}{T_0} \quad (2)$$

其中，Q_e为单位数量能源所对应的等效电，kWh/kg或kWh/m³；Q为单位数量能源所含的热量，kWh/kg或kWh/m³；η为能质系数，可由对外做功温度T_1和外界温度T_0计算。

这种能源折标方法科学合理性更强，也综合了能源的数量、品位和可利用度，实际应用潜力巨大，在食品冷链的综合能耗分析和能效评估中亦具有较强的适用性。食品冷链中消耗的能源主要为汽油、柴油、电力等，其单位数量等效电分别为7.893 kWh/kg、7.816 kWh/kg、1 kWh/kWh等[27]。在实际工程应用中，应依据当前技术水平来计算等效电转换系数，从而提高数据的准确性和真实性。

标准煤作为典型的能耗折算标准一直被广泛沿用至今，有着大量的研究和成果作为参考，且在以火力发电为主其他新能源发电方式协同发展的中国，将其应用到食品冷链的能耗折算中最为实际、便捷。对于在食品冷链领域应用较少的能值理论，其基本理论体系已较为完善，并且还能计算劳力、农机产品以及包装材料等其他资源的消耗情况，所以太阳能值可作为一种较为综合的资源消耗折算标准。然而，由于能值转换率计算过程较为复杂、更新也十分缓慢。因此，该折算标准的时效性较差，若需应用应先保证各能值转换率的高可信度。最后，对于综合能源数量、品位和可利用度的等效电折算标准，虽与之相关的应用研究较少，但其优点明显，因而应用潜力巨大。为此，将其应用到食品冷链的能耗分析中具有较大的参考意义。

3.2 能耗分析

一般食品冷链流程为：生鲜农产品从产地采收后向生产商运输；生产商对生鲜农产品进行加工、杀菌、气调、包装以及预冷等操作，从而满足用户对食品的特定需求；生产商委派第三方冷链物流公司（有时也自营）将产品运输到目的地的配送中心，一般情况下，需要采用冷藏车进行运输，因为运输距离较长，有时也采用火车、货船、飞机等运输方式；到货后，配送中心对产品进行堆垛、冷藏储存、分拣、配货等操作；然后配送中心指派冷藏车辆将产品运输至各零售商；零售商将收到的一部分产品陈列在冰柜、冰箱等设备里，其他部分存进仓库（这里假设零售商都会对收到的食品进行冷藏）；最后，消费者自行到商店、超市或者批发市场购买产品，个别零售商也提供配送服务。

假设有一批次生鲜农产品初始重量为A kg，为长途冷藏运输卡车（第二次运输）最大载重量的α倍（α为正整数），且不考虑各类运输车辆的返程油耗。假设生鲜农产品不会产生明显的重量变化，下面将从食品冷链产品层面对该批食品进行详细地能耗分析。

（1）第一次运输。某一批次生鲜农产品从产地采收后需要将其搬运或者运输至特定地点（小作坊、食品加工厂、大型生产企业等生产商）以进行下一步操作。若由人力搬运则不用计算其能耗，若采用相应车辆运输则需考虑其燃油消耗（E_{v1}，L）。因为此段路程相对短，所以一般不用冷藏车进行运输。随着冷链技术和管理水平的提升，有些田间已设有移动冷库等以实现农产品的田间预冷，从而减少“最先一公里”的食品质量损失，避免“断链”。因此，田间预冷后会采用冷藏车进行冷藏运输。对于冷藏车辆，制冷系统一般由车辆发动机驱动，能源消耗主要来自燃油消耗。对于移动冷库，其主要消耗电力来实现生鲜农产品的预冷，本文对移动冷库的能耗不作考虑（其计算方法可参考

公式（3））。

$$E_{r1} = E_1 \cdot A \tag{3}$$

其中，E_{r1} 为预冷消耗的电力，kWh；E_1 为该冷库的单位产品能耗（电耗），kWh/kg。

车辆行驶过程的能耗获取方式可有两种方法：一种方法为直接获得法，即从车辆仪表盘上直接获得一次运输的耗油量（M_1，L）；另一种为间接获得法，即根据车辆的运输距离和单位运输距离的平均油耗水平进行计算，计算方法如公式（4）。

$$E_{v1} = D_1 \cdot (V_1 + R_1) \cdot A = D_1 \cdot F_1 \cdot A \tag{4}$$

其中，D_1 表示各车辆第一次运输距离的总和，km；V_1 为单位产品单位距离行车耗油量，L/(km·kg)；R_1 为单位产品单位距离制冷耗油量，L/(km·kg)；F_1 为该类车辆单位产品单位距离耗油量，L/(km·kg)。

两种方法各有区别：直接获得法获取的能耗数据更为可靠和实际；间接获得法获取能耗数据更为便捷，直接计算即可，还更有利于能耗数据获取的自动化，但受到食品种类、车速、气温等影响，所获得能耗数据的误差较大，实际应用时可进行针对性能耗试验对 F_1 进行修正。

（2）生产商。生产商等对这一批到货的生鲜农产品进行生产加工，然后对产品进行预冷处理，使产品处于适宜的温度窗口，从而减少田间热，降低质量损失和后续冷藏运输能耗。生产商的其他活动也会产生相应的能耗，如农产品的装卸、冷库的盘点、冷库的照明、人员办公等，但因能耗相对较少，所以不计入总能耗，由于生产商处冷藏时间较短，耗能较少，此处不作考虑，计算方法可参考公式（5）和（6），也可根据冷库每年单位体积的耗电量和冷库设计规范进行计算。本文主要考虑加工消耗的电力(E_p，kWh)、预冷消耗的电力（E_{r1}，kWh），如公式（3）、(7）和（8）所示。此外，也可以通过查看电表来统计单位产品的实际耗电量，从而计算出这一批次产品的能耗，此处不再赘述。

$$E_{r2} = E_2 \cdot A \tag{5}$$

$$E_2 = \frac{P_{s2} \cdot t_{s2}}{B_2} \tag{6}$$

$$E_p = A \cdot \sum_{i=1}^{n} E_{pi} = \sum_{i=1}^{n} P_i \cdot t_i \tag{7}$$

$$E_1 = \frac{P_{s1} \cdot t_{s1}}{B_1} \tag{8}$$

其中，E_2 为该冷库的单位产品能耗（电耗），kWh/kg；P_{s2} 为冷库制冷装置功率，kW；t_{s2} 为冷库冷藏时间，h；B_2 为该冷库的最大容量，kg；E_{pi} 为 i 加工设备的单位产品能耗（电耗），kWh/kg；P_i 为 i 加工设备的功率，kW；t_i 为 i 加工设备的加工时间，h；P_{s1} 为预冷时制冷装置功率，kW；t_{s1} 为冷库预冷时间，h；B_1 为该冷库的最大容量，kg。

（3）第二次运输。一般情况下，生产商将生产加工完成的食品委托给第三方冷链物流公司，由其将产品运输至目的地的配送中心。此阶段的这批食品一般由柴油发动的重型卡车进行长途冷藏运输，其间能耗（E_{v2}，L）计算方式如公式（9）所示。

$$E_{v2} = D_2 \cdot (V_2 + R_2) \cdot A = D_2 \cdot F_2 \cdot A \tag{9}$$

其中，D_2 表示各车辆第二次运输距离的总和，km；V_2 为单位产品单位距离行车耗油量，L/(km·kg)；R_2 为单位产品单位距离制冷耗油量，L/(km·kg)；F_2 为该类车辆单位产品单位距离耗油量，L/(km·kg)。

（4）配送中心。配送中心对到来的产品进行码放、堆垛、存储、分拣以及配货等操作，其间有场内机动车辆的燃油消耗，也有制冷设备和其他机械设备的电力消耗，而以制冷设备的电力消耗（E_{r2}，kWh）为主，其计算方式如公式（5）和公式（6）所示。

（5）第三次运输。配送中心根据订单信息指派车辆将该批产品运输至各零售商。此阶段的这批食品一般由小型冷藏货车进行短途运输，其间的能耗（E_{v3}，L）计算方式如公式（10）所示。

$$E_{v3} = D_3 \cdot (V_3 + R_3) \cdot A = D_3 \cdot F_3 \cdot A \tag{10}$$

其中，D_3 表示各车辆第三次运输距离的总和，km；V_3 为单位产品单位距离行车耗油量，L/(km·kg)；R_3 为单位产品单位距离制冷耗油量，L/(km·kg)；F_3 为该类车辆单位产品单位距离耗油量，L/(km·kg)。

（6）零售商。零售商将收到的产品进行陈列、冷藏储存等，以便于销售给消费者。本文不考虑消费者搭乘交通工具所产生的能耗和个别商家提供的商品配送服务产生的能耗等。为此，为简便计算，假设陈列区容量为 O kg，这一批次的食品都要通过

上架陈列销售，陈列时间恒定。但此时这一批重量为A的产品在零售商仓库冷藏储存的时间各有不同，因此，假设当这批产品到货后不会马上进行上架销售，而是先进行冷藏储存，等该陈列区的产品销售完时，零售商才会从仓库进行补货，补货周期恒定为T h，即上架售卖时间就是补货周期。零售商主要的能耗为商品陈列电耗（E_d，kWh）和商品冷藏储存电耗（E_{r3}，kWh），具体计算方式如公式（11）～（14）所示。

$$E_d = E_c \cdot A \tag{11}$$

$$E_c = \frac{P_c \cdot t_c}{C} = \frac{P_c \cdot T}{C} \tag{12}$$

$$k = \frac{A}{O} \tag{13}$$

$$E_{r3} = E_3{'} \cdot (1 + [k]) \cdot (k - [k]/2) \cdot O \cdot T \tag{14}$$

其中，E_c为该冷藏设备（如冰柜、冰箱等）的单位产品能耗（电耗），kWh/kg；P_c为该冷藏设备功率，kW；t_c为设备冷藏时间，h；C为该冷藏设备的最大容量，kg；E_3'为该冷库的单位时间单位产品能耗（电耗），kWh/(kg·h)，可根据试验获得，也可根据该冷库实际电耗信息计算获得；k为补货次数，[k] 为不超过k的最大整数。

综上所述，选择标准煤作为能耗折算标准，各能源或耗能工质折标准煤系数可参考表3，则这一批食品综合能耗计算如公式（15）。

$$E = E_{v1} \cdot \eta_1 + (E_p + E_{r1}) \cdot \eta_e + E_{v2} \cdot \eta_2 + E_{r2} \cdot \eta_e + E_{v3} \cdot \eta_3 + (E_d + E_{r3}) \cdot \eta_e \tag{15}$$

其中，E为综合能耗，kgce；η_1、η_2、η_3为第一、二、三次运输时各类燃油的折标准煤系数，kgce/kg；η_e为电力的折标准煤系数，kgce/kWh。

3.3 能效评估指标

在3.2节中，选定统一的能耗折算标准后，便捷地计算出了该批食品冷链的综合能耗。但仅单一的综合能耗这一指标只能评估冷链的整体资源消耗程度，并不能评估冷链整体能源的利用程度和效率。因此，使用评估模型、方法等工具分析食品冷链的能源效率，提高冷链能效的透明度十分必要。

现有的文献、报告等鲜有对食品冷链这类能源密集型系统的综合能效以及综合能效指标体系的构建研究。因此，为了更为全面、系统地评估食品冷链系统的能效，本文参考李妍等[29]构建的能源综合服务站系统的综合能效评估指标体系以及赵赫[30]的能效评估相关理论，从而构建起涵盖宏观能效指标、微观能效指标、能源经济指标、能源环境指标、综合能效指标的食品冷链综合能效评估指标体系，如图2所示。

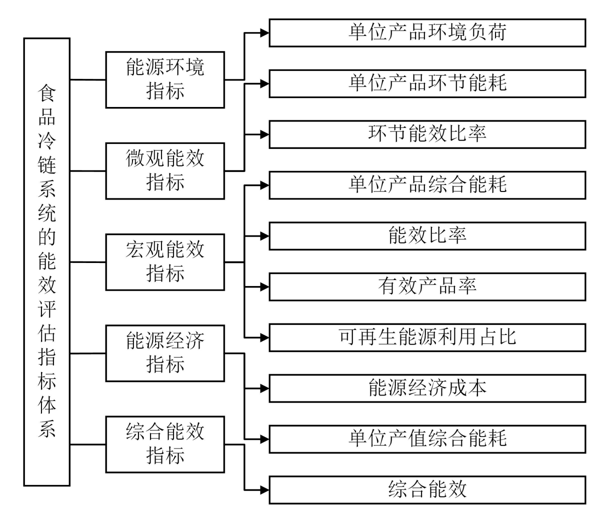


图2 食品冷链综合能效评估指标体系

Fig. 2 Comprehensive energy efficiency evaluation index system of food cold chain

3.3.1 宏观能效指标

宏观能效指标指从系统整体的角度分析系统的能源利用情况[29]，包含单位产品综合能耗、能效比率、有效产品率、可再生能源利用占比。

（1）单位产品综合能耗（H_1，kgce/kg）是指统计报告期内，综合能耗与合格产品产量（作业量、工作量、服务量）的比值[24]，在这里指的是该批次食品冷链综合能耗E与该批次最终售卖的重量A' kg之比（公式（16）），该比值可反映本冷链整链能耗水平的进退，也服务于食品冷链行业的能源统计与管理。

$$H_1 = \frac{E}{A'} \tag{16}$$

（2）能效比率（H_2）为综合能源消耗的实测值E'与理论值E之比（公式（17）），比率低表明能耗实际值较低于理论值，能源利用率高；比率高表明能耗实际值较高于理论值，能源利用率低[31]。

$$H_2 = \frac{E'}{E} \tag{17}$$

（3）有效产品率。食品在冷链各环节中或多或少地会产生质量损失和腐败变质，只有能够食用

的食品才可以进行售卖。因此，有效产品率（H_3）反映的是每批次冷链食品的有效保护程度，其值越高代表着该冷链能够提供更多高品质的产品，但随之带来的可能是较高的能源消耗和碳排放，计算方法如公式（18）。

$$H_3 = \frac{A'}{A} \tag{18}$$

（4）可再生能源利用占比（H_4）指该批次食品冷链中可再生能源消耗占综合能耗的比例，计算方法如公式（19），该比值的大小反映的是食品冷链对可再生能源的消纳水平[29]，同时也在一定程度上反映了食品冷链的可持续性强弱。

$$H_4 = \frac{\sum_{i=1}^{n} E_{rei} \cdot \eta_{\mathrm{rei}}}{E} \tag{19}$$

其中，E_{rei} 为第 i 种可再生能源的消耗量；η_{rei} 为第 i 种可再生能源的折标准煤系数。

3.3.2 微观能效指标

微观能效指标可用于分析食品冷链系统内部的能源利用情况，并有利于食品冷链各环节的优化设计和节能减排措施的实施。参考3.3.1节内容，本节主要介绍两种微观能效指标，即单位产品环节能耗（W_{qi}）、环节能效比率（$W_{\lambda i}$）（$i=1, 2, 3, \cdots, 6$）。单位产品环节能耗 W_{pi} 可反映冷链某环节能耗水平的进退，而环节能效比率 $W_{\lambda i}$ 则反映某环节能源利用程度的高低，计算方法如公式（20）和（21）所示。

$$W_{qi} = \frac{E_{qi}}{A} \tag{20}$$

$$W_{\lambda i} = \frac{E'_{qi}}{E_{qi}} \tag{21}$$

其中，E'_{qi} 为第 i 环节能耗实测值，kgce；E_{qi} 为第 i 环节能耗理论值，kgce，可参考3.2节能耗计算。

3.3.3 能源经济指标

能源经济指标可涵盖食品冷链的成本、产值等特性，从经济性的角度对冷链进行评估，包括能源经济成本、单位产值综合能耗。

（1）能源经济成本（J_1，元/kg）指该批次食品冷链单位食品所消耗能源的经济成本，反映了该食品冷链系统的能耗经济性水平，计算方法如公式（22）所示。

$$J_1 = [E_{v1} \cdot P_{f1} + (E_p + E_{r1}) \cdot P_{e1} + E_{v2} \cdot P_{f2} + E_{r2} \cdot P_{e2} + E_{v3} \cdot P_{f3} + (E_d + E_{r3}) \cdot P_{e3}]/A \tag{22}$$

其中，P_{f1}、P_{f2}、P_{f3} 为燃油的单位成本，元/L；P_{e1}、P_{e2}、P_{e3} 为不同地区的电价，元/kWh。当使用可再生能源、改用新能源冷藏车等节能减排措施时，计算方法与公式（22）类似。

（2）单位产值综合能耗（J_2，kgce/万元）指统计报告期内，综合能耗与用能单位总产值或增加值（可比价）的比值[24]。这里指该批次食品冷链综合能耗（E）与该批次食品最终售卖额（P_p，万元）之比，表示产生单位价值食品所投入的能源量，反映的是冷链发展对能源的依赖程度，其值越低，表示依赖程度越低。计算方法见公式（23）。

$$J_2 = \frac{E}{P_p} \tag{23}$$

3.3.4 能源环境指标

单位产品环境负荷（N，kg/kg）是指该批次食品冷链整个流程中有效运输单位重量食品所产生的污染物总量，计算方法见公式（24）。本文主要考虑温室气体的排放，即总碳排放 F kg。此外，单位产品环境负荷还可以反映该食品冷链的清洁水平和可持续性程度等。

$$N = \frac{F}{A'} \tag{24}$$

3.3.5 综合能效指标

综合能效（S）能将能效的内涵加以一定程度的扩大化，针对某一系统整体，在符合其基本要素和运行约束的前提下，将各类投入转化为产出的综合效率[30]。由上文可知，食品冷链可由诸多能效指标进行评估，各指标间也存在着相互的制约，典型的例子就是有效产品率与单位产品综合能耗、单位产品环境负荷之间的约束，欲提高终端食品的感官品质和品质质量，就应适当降低整链食品的温度，相应地，整链的能源投入和碳排放也会因此增加。

为此，为了全面权衡各能效指标，在综合能效计算模型中，往往将功能性、经济性、环保性等多维度指标综合起来，赋予相应权重，从而构建起综合能效指标评价模型，进而评价系统的整体能效[30]。

3.3.6 其他能效评估指标

目前，关于不同能源密集型供应链的能源消耗和评价指标的各种研究已有报道。Marchi 和 Zanoni[32]提出了一种考虑质量损失的食品冷链简化通用模型，实现了在特定能耗上评估能效措施对提高冷链可持续性的影响。Xiao 等[33]基于单位能量因数能耗法提出了一种用于鲜食葡萄供应链管理的节能潜力评估方法，实现了正常链、保温链和冷链三种供应链模式下的能耗计算和节能潜力评估。Diaz 等[34]对牛肉供应链的三种潜在能效措施进行了生命周期评价和生命周期成本评估，结果表明，最佳潜在能效措施是利用牛肉废弃物进行厌氧消化生产出新能源。

国内外炼油行业的能效评价体系也较为完善，因此，其中的评价指标和分析方法也可应用到食品冷链的能效评估中。比如，Zhang 和 Li[35]根据能量因数法，计算了产品整个生命周期的能耗并估算了其节能潜力。谢小华[36]通过采用单位能量因数能耗法评估了炼油工业的能耗和节能潜力，结果表明，该方法可以有效地代表炼油工业过程的节能潜力。董爽等[37]建立了基于能量密度指数（Energy Intensity Index，EII）的能效评价指标模型，该模型可用于衡量包含炼油和化工装置的石油化工企业综合能耗水平。周英明等[38]采用灰色系统理论分析法，建立灰色关联序，得出了原油集输系统联合站能耗影响因素的主次性。冯洪庆等[39]也运用灰色关联理论提出了针对炼油企业能耗的星级指标评价体系，该方法能从宏观上反映炼油企业总体能耗水平，并从微观上反映企业内部各装置能耗是否合格。因此，在食品冷链上也可采用灰色系统理论分析法来评估能耗影响因素的顺序，从而针对最大影响因素制定相应能效措施。

通过以上的研究，得出5种能效评估指标在食品冷链中具有相对更大的参考价值，其产品类型、原理以及优缺点如表4所示。实际比能耗（Specific Energy Consumption，SEC）的计算模型虽然相对复杂，所需参数更多，但其同时考虑了库存水平、储存时间、填充水平以及食品质量损失等对比能耗的影响。所以，在条件充足时，可参考应用。此外，还可运用节能潜力评估法来确定冷链的平均节能潜力，从而提高整冷链能耗的透明度，然后再运用灰色系统理论分析法建立灰色关联序，从而得出食品冷链中能耗影响因素的主次，最终可根据最大影响因素制定特定能效措施，从而达到能耗与碳排放最小化及利润最大化的目的，实现食品冷链经济与环境的平衡，促进食品冷链的可持续发展。

4 碳排放核算

碳排放是温室气体排放的简称，其主要为二氧化碳排放，其他温室气体如甲烷、氟利昂等的排放可以通过联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC）计算的GWP转换为二氧化碳当量后再进行汇总。而碳足迹是对某一产品或活动在生命周期内直接及间接引起的温室气体排放量的度量，以二氧化碳质量当量为单位[41]。食品冷链中主要排放的是二氧化碳，且二氧化碳是全球变暖主要原因。

除能源消耗产生的二氧化碳排放以外，制冷剂的泄漏也是一大碳足迹贡献因素。在商用制冷设备中，每年有高达15%的制冷剂泄漏，且不同系统、不同使用环境之间的泄漏也有很大差异[8]。因此，在准确计算碳足迹时，制冷剂的泄露也应该计算到碳足迹之内，且可根据每次制冷剂的填充量来对泄漏率进行修正。

碳排放总量的计算公式一般为各能源消耗量与相应碳排放因子的乘积之和。也可通过实际测量以及特殊的模型计算获得。但由于食品冷链中消耗的能源种类相对不多，碳排放实际测量也并不便捷，具体模型的核算步骤也相对繁杂。因此，这两种方法应用相对不多。

4.1 核算边界

对于碳排放系统的边界，在3.1.2节中提到综合能耗应为输入减去同质的输出，电力消耗应计入使用单位。因此，在计算食品冷链的碳排放时，不仅需核算冷链各环节引起的直接排放，还应当核算电力生产时的碳排放，即电力的间接碳排放，而不应将其计入火力发电厂的碳排放总量中。为便于分析碳排放的主要来源，可建立分层的碳足迹清单，即产品或活动引起的直接排放、能源消耗导致的间

表4 5种能效评估指标的比较

Table 4 Comparison of five energy efficiency evaluation indicators

技术模型/方法	产品类型	原理	优点	缺点
基于单位能量因数能耗法的节能潜力评估模型[33]	鲜食葡萄	供应链实际单位能量因素与理论单位能量因素之比，其值越高，节能潜力越低	反映平均节能潜力，计算简单方便，易应用	难以反映供应链各环节储运输条件、质量损失等对能耗的影响
实际比能耗模型[32]	乳制品：奶酪	供应链各阶段比能耗之和与各阶段质量损失之和的比值即为实际总比能耗，反映每生产一单位最终产品所需的能耗	同时考虑各种能耗影响因素，计算精度高；能反映供应链各环节节能效水平的高低	参数多，难获取，计算过程较为复杂，且有些参数和公式由试验获得，增加了计算误差
基于灰色关联理论的星级评价[39]	炼油企业产品	灰色关联聚类分析各类装置能耗指标数据，将其分成三类，再将每一类平均值作为星级范围临界值，依据所确定的三个临界值把各装置能耗划分为四类，即四个星级	宏观层面分析企业的总体能耗水平，能评估各装置能耗合理性	只能依靠现有能耗数据，不能对各过程能源消耗进行单独计算
基于能量密度指数的综合评价指标[37]	炼油企业产品	参照EII方法建立新的关于化工及其他装置的能量密度指数，两能量密度指数与两类装置权重赋值的乘积之和即为能效综合评价指标，其数值越小，代表该炼厂能效水平越高	衡量综合能耗水平，普适性较好；考虑了工艺装置不同因素对装置能耗产生的影响；能实现同行业不同企业间的能耗水平对比	EII与产品质量没有关联；能耗基准为国外装置统计值，没有考虑地区生产技术差异，国内应用相对局限
单位可比综合能耗模型[40]	石灰	修正后的石灰综合能耗与合格石灰产量之比即为该产品的单位可比综合能耗	考虑不同场景下能源折标系数的改变；可有效对比同行业不同企业的能耗水平	石灰修正系数算法的普适性不强，修正系数具有特殊性

接排放、其他所有间接排放共三层逐层增大的碳足迹清单[41,42]。因此，对于食品冷链的碳排放核算，应至少建立前两层的碳足迹清单。而由于第三层清单数据量更大、更难获取、更难核算，所以为了兼顾可行性与效率，可在食品冷链相关企业或者组织进行节能减排的能源统计和碳排放评估分析时，再将其他所有间接排放计算入内，从而为制定实际有效的节能减排措施提供参考。

4.2 折算标准

从图1可以看出，食品冷链的各个环节中所消耗的一次能源为化石燃料，会产生直接温室气体排放，消耗的电力（二次能源）也会产生间接温室气体排放，使用的其它资源也是由相关一次、二次能源生产的，也会直接或间接产生温室气体排放。为此，能源的消耗总是伴随着温室气体的排放，可将各种温室气体排放根据GWP折算为二氧化碳排放，从而评判食品冷链的清洁水平。二氧化碳排放即碳排放主要通过碳排放因子来计算，碳排放因子指的是消耗单位能源时所产生的二氧化碳的质量，相同的能耗量也会因不同碳排放因子的参考标准而产生不同的碳排放计算量。特别是食品冷链中消耗的主要二次能源——电力，其碳排放因子在不同计算方法或参考标准下差异也较为明显，同时也备受争议。

斯坦福大学Jacobson教授比较了几种不同能源发电技术的百年二氧化碳排放总量（生命周期碳排放、机会成本碳排放、人为热量、人为水蒸气碳排放、核武器和核泄漏风险碳排放以及土地和植被中碳储存损失碳排放的总和），结果显示，煤电碳排放值为282～1011 g/kWh[43]。虽然该方法综合考虑了多种因素对碳排放因子的影响，值得借鉴，但该碳排放因子不具有代表性，因为每个国家的产电技术、水平有所不同，所以电力的碳排放因子也有所不同。田长青等[44]计算先进制冷机组碳减排量时所采用的碳排放因子为583.9 g/kWh，值得参考。另外，还可以通过公式来计算电力的碳排放因子，结果更为准确。比如，刘晃和车轩[45]、金书秦和陈洁等[46]利用公式（25）来计算水产养殖耗电所产生的碳排放总量。

电力碳排放因子 = 每度电折标煤数×标煤有效氧化分数×标煤含碳率×碳转换系数(44/12)×火电比例 (25)

中国现有主要的发电方式为火力发电（占发电比例为67.8%），其中以燃煤发电为主，燃气、生物质发电为辅，都产生了大量的碳排放，而其它清洁发电方式如核电、风电、太阳能发电以及水电等所产生的直接碳排放极少[26]。因此，只考虑燃煤火力发电工艺过程的碳排放，而默认其余新能源电力为零排放生产，电力碳排放因子则根据折标准煤耗进行计算，其它能源的碳排放因子可根据公式（26）[47, 48]算得。食品冷链中主要能源碳排放因子参考值如表5所示，实际应用时可根据公式（26）进行修正，也可采用相关设备进行检测。

碳排放因子 = 单位热值含碳量×碳氧化率×热值×碳转换系数(44/12) (26)

表5 食品冷链中主要能源碳排放因子(参考值)

Table 5 Main energy carbon emission factors in food cold chain (reference value)

能源名称	碳排放因子	来源
汽油/(kg·L^{-1})	2.76	[25]
柴油/(kg·L^{-1})	2.73	[25]
电力/(kg·kWh^{-1})	0.581	[49]
标准煤/(kg·kg^{-1})	2.5051	[21]

4.3 核算方法

食品冷链碳排放包括直接碳排放和间接碳排放，在其核算方法上也有着明显的区别。碳排放核算方法主要有排放因子法、生命周期评价法、投入产出法和混合生命周期评价法等。食品冷链碳排放的核算是制定实际碳减排措施、标准、政策等的先决条件，因此，在原有方法基础上探索出适合食品冷链碳排放的核算方法十分关键。

4.3.1 排放因子法

排放因子法即碳排放量为能源消耗量与相应能源碳排放因子的乘积，其碳排放因子可从IPCC编制的温室气体排放清单中获取。排放因子法的优点在于全面核算各种化石燃料燃烧导致的温室气体排放，数据获取方便，计算过程较为简便，适用于各尺度能源的碳足迹核算[50]。但缺陷在于仅能进行直接能源的碳排放测算，使用范围局限，并且碳排放系数主要参考IPCC编制的温室气体排放清单，而没有考虑世界各国各地区装备、技术、能源等的差异性，使得核算结果存在一定误差[51]。如中国主要使用的能源是高灰分低品质的煤炭，虽然其单位热值含碳量与IPCC标准默认值相差无几，但其热值显著低于IPCC标准默认值，所以煤炭的实际碳排放因子低于IPCC默认值，从而导致采用排放因子法估计的2013年中国化石燃料燃烧和水泥生产碳排放量偏高约14%[52]。因此，碳排放因子可以参考公式（25）和（26）进行修正。该方法已被广泛用于工业与生活部门的碳排放研究，并已成为国际公认和通用的碳排放核算方法[51, 53]。

4.3.2 生命周期评价法

生命周期评价（Life Cycle Assessment，LCA）起源于1970年左右，前期的研究大多与包装有关，而许多其他产品在80年代末才逐渐被进行分析[54, 55]。目前公认的生命周期评价定义为“产品系统在其整个生命周期内的输入、输出和潜在环境影响的汇编和评估”[56]。其中，环境影响包括能源使用、资源消耗、污染物排放等[57]。该方法包括四个阶段，分别为目标和范围定义、清单分析、影响评估、结果解释[55-57]。

作为一种自下而上的碳足迹计算方法，LCA法能够以系统、准确的方式来评估食品冷链中的碳排放，并考虑了产品的所有方面以及评估了对环境的影响，适用于产品等微观层面，因此，这一方法更为综合、全面，十分适用于食品冷链具体的总体碳排放计算中，但所需数据较多，并且计算过程也较为复杂，是一种精确计算碳排放的综合手段。

此外，LCA法需要考虑数据、模型、方法、情景等方面带来的不确定性[41, 58-60]。而数据不确定性是LCA研究中最常分析的不确定性来源，并且通常使用随机建模（主要为蒙特卡罗模拟）进行分析[59]。不可靠的数据来源、不恰当的建模、不合适的核算方法都会降低LCA数据的质量以及最终碳排放计算结果（碳足迹）的可信度。因此，减少LCA数据的不确定性是十分需要的，现有的国内外研究也较多。如计军平和马晓明[41]认为应先确定合适的核算方法，再确保数据质量达到ISO14044

及PAS2050所规定的标准，比如代表性、准确性、一致性等。黄娜等[58]先评估LCA案例开始的不确定度，然后通过蒙特卡罗模拟得出LCA结果的不确定度，再结合敏感度分析指出控制和改进LCA数据质量的关键点，最终提出的定量评估并控制LCA数据质量的系统化方法（CLCD-Q法）也具有一定参考价值。

另外，蒙特卡罗模拟最常用于LCA软件，需要大量输入参数以及相关概率分布的信息，从而需要大量的计算时间，因此还可通过其他方法如模糊数据集、不确定性传播分析、概率模拟、贝叶斯统计和泰勒级数展开法[59, 61, 62]等进行替代。为克服蒙特卡罗模拟通常只用于解释数据不确定性，而非模型或影响评估方法不确定性的缺点，可以将蒙特卡罗模拟与其他不确定性分析方法相结合，如与基于专家判断的半定量分析相结合[62]。同时也可以参考Mahmood等[60]提出的同时考虑参数、情景和模型不确定性的一个包容性框架。

LCA目前主要应用于产品和服务方面，适用于微观层面的碳足迹核算[53]。随着LCA应用实践的增加，应用领域的拓展，LCA已逐渐被用于食品冷链的碳排放计算中。Stoessel等[63]使用生命周期评价法对瑞士一家大型零售商的34种水果和蔬菜进行了碳足迹、水足迹等环境影响评估，其结果可为零售商提供采购决策支持以及改进供应链的管理，所建立的生命周期清单（Life Cycle Inventory，LCI）同样适用于其他案例研究。Wu等[64]将生命周期评价与虚拟冷链相结合，实现了运用计算流体动力学跟踪冷链托盘中每个水果的冷却过程和水果质量衰减的热历史，并量化了整链的碳足迹。陈静等[65]将生命周期评价法与系统动力学法相结合建立了生鲜肉类食品冷链的系统动力学模型，测算了该冷链各环节的碳排放量。其他运用LCA核算食品冷链碳排放的例子还有新鲜番茄[66]、草莓[67]、香蕉[68]等。

总之，LCA为食品冷链相关的管理人员提供了具体而全面的能耗、碳排放信息，为食品冷链的可持续发展提供了理论支持，同时也为相关标准、政策、法律的制定提供了一定借鉴。

4.3.3　投入产出法

投入产出分析（Input-Output Analysis，IOA）是一种自上而下的分析方法，反映了各部门初始投入、中间投入、总投入与中间产出、最终产出、总产出之间的关系[50]。IOA由美国经济学家Leontief于1936年提出，用于研究美国各部门间的经济关系[50, 69]。此后，经过不断的发展完善，IOA已成为了在中宏观层面上较为完整和成熟的碳足迹核算的主要方法[50]。相较于微观层面应用较多的LCA法，IOA法不存在边界问题，能够避免LCA法的截断误差[70, 71]，同时还能明确各部门间的直接和间接碳排放关系。

基于IOA的碳足迹核算步骤一般为投入产出表（Input-Output Table，IOT）的制定、碳足迹模型构建、碳足迹核算和结果分析[50]。一般碳足迹核算模型为环境拓展的多区域投入产出模型[41, 71-73]，可结合各部门的温室气体排放数据从而计算各部门为消费者生产食品或提供相关服务而在整个供应链上造成的温室气体排放量，即总体碳排放，计算方法见公式（27）。

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{b}\cdot(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{A})^{-1}\cdot\boldsymbol{Y} \tag{27}$$

其中，$\boldsymbol{E}$为各部门为满足最终需求$\boldsymbol{Y}$而造成的直接和间接温室气体排放量矩阵；$\boldsymbol{b}$为直接排放系数矩阵，其中的元素代表相应部门每单位货币产出直接排放的温室气体量；$\boldsymbol{I}$为单位矩阵；$\boldsymbol{A}$为直接消耗系数矩阵；$\boldsymbol{Y}$为最终需求向量。

IOA还可以将Leontief逆矩阵进行泰勒展开，从而进行结构路径分析，进而得到整个供应链上的热点[73]。例如，Minx等[71]在一个通用多区域投入产出模型中应用结构路径分析，发现了肉类供应链中温室气体排放的热点，同时还指出该类链中大量的小工序共同造成了肉制品供应链中很大一部分碳排放，而这可能会被LCA法中边界划分时所截断。Camanzi等[73]基于环境拓展投入产出法对欧盟中25个国家的食品和非酒精饮料供应链从生产到废物管理所造成的环境影响进行了估算，并进行了结构路径分析，从而确定了供应链中碳排放最高的热点。

另外，IOT的编制需要耗费大量的时间和精力，更新缓慢，具有较强的滞后性，因此利用往年

的投入产出数据进行核算时不免会造成结果误差[74]。当使用不同的数据库时，碳足迹也会有所不同。此外，IOT所统计的是特定年份的平均数据，并不能反映某个具体产品的生命周期结果，在进行精确明细、实时快速的碳足迹分析时存在局限[50]。

在食品冷链中，重点是归结到产品尺度的碳足迹核算，而由于IOA法以部门数据为基础，在同一部门内产品生产和提供相关服务的碳排放并不完全相同，并且使用的是部门平均排放强度数据，因而难以应用于微观系统的分析，从而限制了IOA法在食品碳足迹核算上的应用。因此，将LCA与IOA相结合的替代核算方法将在一定程度上提高食品碳足迹核算的精准度。

4.3.4 混合生命周期评价法

混合生命周期评价法（Hybrid LCA，HLCA）将投入产出分析和生命周期评价整合在同一分析框架内，结合了两者的优点，在食品冷链的碳排放核算上，相对于一种核算方法具有更高的适用性。该方法由Bullard等于20世纪70年代第一次石油危机之后提出，当时主要用于能源的投入产出分析[75-77]。其计算公式与IOA相似，如公式（28）[41, 77]。

$$\boldsymbol{E'}=\begin{bmatrix}\tilde{\boldsymbol{b}} & 0\\ 0 & \boldsymbol{b}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\tilde{\boldsymbol{A}} & \boldsymbol{M}\\ \boldsymbol{L} & \boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\zeta\\ 0\end{bmatrix} \tag{28}$$

其中，$\boldsymbol{E'}$为研究对象的温室气体排放量；$\tilde{\boldsymbol{b}}$为微观系统的直接排放系数矩阵；$\tilde{\boldsymbol{A}}$为技术矩阵，表示研究对象在生命周期各阶段的投入与产出；$\boldsymbol{L}$表示宏观经济系统向研究对象所在的微观系统的投入，与投入产出表中的特定部门相关联；$\boldsymbol{M}$表示研究对象所在的微观系统向宏观经济系统的投入；ζ为外部需求向量。$\boldsymbol{b}$、$\boldsymbol{I}$及$\boldsymbol{A}$的含义同公式（27）。

混合生命周期评价模型将研究对象（如食品）生命周期各阶段的投入与产出通过一个技术矩阵$\tilde{\boldsymbol{A}}$表示，实现了微观系统与宏观部门之间的连接。这样既保留了生命周期评价法针对性的特点，又避免了截断误差，同时还能有效利用已有的投入产出表，减少了碳足迹核算过程的时间和精力的投入，提高了碳足迹核算的适用范围，适用于宏观和中微观各类系统的分析[41]。相比于IOA法，混合生命周期评价法矩阵系数更为繁杂，计算过程更为繁琐。因此，混合生命周期评价法对碳排放核算相关人员的理论水平和技术要求较高，在推广应用到食品冷链的碳排放核算以及其他行业中较为困难，即普适性不强。

混合生命周期评价法与传统基于过程的不完整系统边界的生命周期评价法相比，对于碳排放核算精度的提高并非绝对[78-80]。混合LCA的投入产出模型中异构进程的聚合可能会为引入更多的误差，并且只有当混合生命周期评价和生命周期评价具有相同的详细程度时，两种方法才会产生相同的结果[78]。但总的来说，混合LCA法拓展了足够大的系统边界和提供了高分辨率的数据，实现了在更广泛的行业部门中对特定过程或产品进行建模[81]。随着方法和模型的不断完善，借助计算机简化混合生命周期评价的建模过程方兴未艾[50]。

本节介绍了四种碳排放核算方法，重点阐述了生命周期评价法的由来、原理、不确定性、优缺点以及在食品冷链上的应用等。不同核算方法有着不同的适用范围和边界，各自的优缺点也较为明显，如表6所示。如前文所述，生命周期评价法在食品冷链产品层面的碳排放核算上具有较好的适用性，而混合生命周期评价法虽然避免了LCA因边界划分带来的截断误差，但其核算过程较为复杂，并且由于没有完整的验证过程模型来证明混合LCA的性能[78]，所以其相对核算精度的高低也善不明确。此外，运用一定的方法或模型解决LCA法的不确定性之后，LCA法可以更为准确、便捷地计算出食品冷链的碳排放。而对于IOA法，随着IOT中关于部门、行业划分的细致化，以及MRIO模型编制的组织化和国际化，IOT具有更强的时效性和可信度，结构分解分析法、情景分析等新兴方法[50]的使用也将促进IOA在食品冷链碳排放研究中的不断发展和完善。

4.4 LCA法的应用

由于LCA法在食品冷链中应用较为广泛，其理论体系也较为成熟，因此，下文将对LCA法在食品冷链上的应用进行简单介绍，阐述其计算碳足迹的基本流程。

表6 碳排放核算方法的对比

Table 6 Comparison of carbon emission accounting methods

方法	排放因子法	生命周期评价法	投入产出法	混合生命周期评价法
起源	IPCC	20世纪60年代末美国开展的一系列针对包装品的分析和评价	提出者Wassily W. Leontief[50, 69]	提出者Clark W Bullard等[75-77]
范围	各尺度的能源碳排放	产品、组织等微观层面	中宏观层面	宏观和中微观各类系统
优点	数据获取容易，计算过程较为简便	核算结果具有针对性；系统、准确、全面，十分适用于食品冷链碳排放的核算	避免了截断误差；能明确各部门间直、间接碳排放关系；可进行结构路径分析，发现供应链上的热点	具有LCA法的针对性和IOA法边界的完整性，相对减少了碳排放核算过程中的时间和精力的投入
缺陷	仅能核算直接能源的碳排放；碳排放系数对IPCC的依耐性较强，没有考虑地区发展的差异性，时效性较差	存在由主观确定系统边界产生的截断误差[57, 70]；数据等的不确定性；资源信息获得所投入的人力、物力较大	较强时间滞后性；不同数据库碳排放核算的特异性；存在部门聚合误差[76]；难以准确反映进口产品或资本商品的温室气体排放量[41]；不能核算产品或服务使用阶段的碳排放	矩阵系数繁杂，计算过程更为繁琐；对人员理论要求较高，普适性不强；碳排放核算精度存在争议

（1）评价目标。本文评价目标是通过对生鲜农产品的全生命周期进行分析，得到生鲜农产品碳足迹的相关数据，如能源消耗与温室气体排放等。了解生鲜农产品生产、运输以及消费等全过程中对环境产生的影响，从而制定有效措施以减少生鲜农产品对环境造成的影响。

（2）功能单位。功能单位定义了产品碳足迹的计量基准，使计算数据标准化[82]。同时，也为研究提供可参考的单位。本文取每千克食品为功能单位。

（3）系统边界。3.2节对一批次食品冷链各环节进行了较为完整的能耗分析，但对于完整的食品冷链碳足迹计算系统边界，还应包括冷链前端生鲜农产品的种植（养殖）和采收、终端消费者的活动以及废弃食物的处理（焚烧、掩埋）等，这些活动与3.2节中的六个活动构成了该食品冷链的活动边界。组织边界由各活动参与者组成，为供应商、生产商、配送中心、零售商和消费者等。

（4）清单分析。清单分析是指列出产品生命周期各阶段能源消耗及温室气体排放的清单数据。

该批食品生命周期的碳足迹模型如公式（29）：

$$G = G_m + \sum_{i=1}^{6} G_i + G_c + G_r + G_w = G_m + [E_{v1} \cdot \gamma_1 + (E_p + E_{r1}) \cdot \gamma_e + E_{v2} \cdot \gamma_2 + E_{r2} \cdot \gamma_e + E_{v3} \cdot \gamma_3 + (E_d + E_{r3}) \cdot \gamma_e]/A + G_c + G_r + G_w \quad (29)$$

其中，G为产品生命周期碳足迹，kg/kg；G_m为原材料获取阶段的碳足迹，kg/kg；G_i为冷链物流第i阶段的碳足迹，kg/kg；G_c为消费阶段的碳足迹，kg/kg；G_r为各阶段总的制冷剂泄露所产生的碳足迹，kg/kg；G_w为食品废物处理阶段的碳足迹，kg/kg。γ_1，γ_2，γ_3分别为第一、二、三次运输消耗燃油的碳排放因子，kg/L；电力碳排放因子γ_e可参考表5。

①原材料获取阶段碳足迹G_m。生鲜农产品生产时间久、碳排放计算困难，若直接通过公式计算则较为复杂，所以可参考其他研究来获得该阶段碳足迹，如文献［83］。

②消费阶段的碳足迹G_c。消费者对购买回去的食品产生的能源消耗和碳排放具有很大的不确定性，与原材料获取阶段碳足迹G_m相同，消费阶段的碳足迹G_c可参考其他研究和成果，如许茹楠等[84]对果蔬消费者储存阶段碳足迹的计算方法和结果。

③总制冷剂泄露的碳足迹G_r。依据单位产品单位时间的制冷剂泄露量、储存时间以及制冷剂对应GWP进行计算，计算方法可参考文献［44, 85］。

④食品废物处理阶段的碳足迹G_w。在整个食品冷链的过程中都会产生废弃食品，而一般会对废弃食品进行填埋处理，计算方法可参考文献［44, 66, 86］。

⑤影响评估。采用该食品冷链生命周期清单分析的结果评估与投入产出相关的潜在环境影响，这

里指能源消耗和温室气体排放。此过程将清单数据转化为具体的影响指标和参数，以便认识该食品生命周期内的环境影响。

⑥结果解释。基于清单分析和影响评估的结果找出该食品生命周期中的一些问题，进而给出结论、建议等。

5 食品冷链节能减排方法

食品冷链包含多个环节，但主要耗能活动为第二次运输（长距离冷藏运输）以及食品在各冷库的储存。食品冷链的节能减排可以从各个环节着手，如改用更清洁的制冷剂，优化配送路径，采用低碳环保能源，使用相变蓄冷技术以及采用数字孪生技术对冷链进行监测等，具体如下。

（1）使用更清洁的制冷剂。制冷设备设施中制冷剂的使用往往伴随着制冷剂的泄露，而像R12、R22等传统制冷剂具有较高的臭氧消耗潜值（Ozone Depletion Potential，ODP）和GWP，其泄露对于臭氧层和全球气温都有巨大的影响。因此，对于大量使用制冷剂和制冷剂泄露率较高的食品冷链，要想减少温室气体排放和对臭氧层的破坏，应加快采用更清洁的制冷剂。天然环保制冷剂一般有碳氢化合物、二氧化碳、氨等，其GWP低，可有效缓解温室效应。2021年4月，中国决定接受《基加利修正案》，加强HFCs氢氟碳化物等温室气体管控。从R12、R22、R410A到R32，制冷剂的替代在不断上演。在2021年9月29日，《中国受控消耗臭氧层物质清单》公布，此次清单做了较大的改动：在清单中新增了18种HFC受控物质，包括制冷剂R32和R410A[87]。因此，食品制冷领域天然环保制冷剂对传统制冷剂的替代刻不容缓。田长青等[44]认为，可以从研究冷链制冷设备环保工质替代适应性的技术路径着手，然后重点突破超低充注模块化氨制冷技术与设备，再发展中小型冷链设备新型环保混合工质制冷技术。

（2）优化配送路径。食品冷链中生鲜食品对环境温度敏感性强，极易腐败变质。此外，运输配送时间同样也会影响食品的感官品质、质量损失以及顾客的满意度。目前，不少冷链物流企业配送环节中冷藏车行驶路线并不合理，徒增运输成本、食品质量损失、能源消耗以及二氧化碳排放。因此，优化冷链物流配送路径尤为重要，该类研究也是热点。可借鉴高浩然等[88]的物流配送优化研究，该研究综合考虑配送环节成本高、碳排放量大、客户满意度低等因素，构建了冷链配送车辆路径优化模型，设计了改进遗传算法求解优化模型，结果显示，该求解算法总能获得权衡成本、产品新鲜度、碳排放的配送方案。此外，还可参考刘思远等[89]结合了路网时变特征和新的多车型碳排放计算方法的生鲜农产品配送路径优化模型，以及提出的一种改进的双策略种群协同蚁群算法，从而有效解决生鲜农产品供应链运输环节中配送模型存在的速度恒定、碳排放计算方法单一的问题。

（3）采用低碳环保能源。能应用到食品冷链系统中的低碳环保能源包括太阳能、电能、氢能以及液化天然气。太阳能是一种绿色、清洁、无处不在的可再生能源，采集便捷。冷藏车进行运输时常常位于室外，而一些冷库房顶拥有足够的区域放置太阳能电池板，因此，可将太阳能光伏发电技术应用到冷藏车制冷系统和冷库制冷系统的供电上。虽然该技术生产的电能可能较少，但在一定程度上减少了冷链的制冷能耗，也间接地减少了由火力发电产生的温室气体排放。如Wu等[64]使用太阳能电力对橙子进行预冷，结果显示，该供应链中每千克橙子可减少为55 g二氧化碳当量的碳排放，总碳足迹可减少8.5%，同时仍能提供相接近的水果品质。此外，电动冷藏车和液化天然气冷藏车的使用也会减少一定的温室气体排放，特别是作为新能源汽车的电动冷藏车，虽然年销售量相对较少，但在国家政策的大力支持下，未来运行于城市内的轻型、微型电动冷藏车将会受到更多的关注。

此外，冯杰和史立[90]将传统冷藏车与纯电动冷藏车配送路径方案相比较，发现两种方案的总成本相近，纯电动冷藏车的路线长度更长，但可减少温室气体的排放，且运输成本也较低，又享有政府补贴，更加符合供应商的配送需求。因此，总的来说，采用更低碳环保能源将会是未来冷藏车发展的一个方向。

（4）使用相变蓄冷技术。作为应对当前全球食品冷链低碳化发展的策略，相变蓄冷技术中相变材

料相变时，能释放大量的冷量，实现短时恒温控制。此外，相变蓄冷技术也是一种节能低碳技术，可循环反复地实现电能的“削峰填谷”（在夜间用电低谷时储存冷量于蓄冷介质中，在白天用电高峰期时释放蓄冷介质中的冷量），减少了企业用电成本，缓解了电网的供电压力。现相变蓄冷技术研究大多聚焦于相变蓄冷材料、蓄冷式冷藏车、蓄冷型保温运输箱、控温包装、蓄冷单元等方面。相变蓄冷技术还能与传统的保温运输箱结合，从而形成一种能吸收可再生能源的蓄冷型运输保温箱，这种保温箱具有灵活、环保、节能、安全以及可控等优点，具有很大的发展潜力[91]。Liu 等[92]设计了一种相变材料外置式蓄冷车，250 kg 的蓄冷剂可满足车厢全天−18 ℃低温需求。与传统机械冷藏车相比，该蓄冷车消耗更少的能源，能耗仅为机械冷藏车的 20% 左右，并产生更低的温室气体排放[93]。

总之，作为一种被动冷却技术，相变蓄冷技术能与传统食品冷链物流形成优势互补，实现高效节能、安全低碳的冷链运输。

（5）采用数字孪生技术对冷链进行监测。食品冷链必须将采后新鲜农产品保持在一个非常狭窄的温湿度窗口，而任何超出这个范围的物流过程都会显著降低食品的感官品质、营养价值以及品质质量。然而，在很大程度上，食品质量损失，特别是零售商销售前的损失仍然不透明，冷链各利益相关者的联系也并不紧密。因此，新兴的数字孪生技术为实现各类传感器数据信息的实时耦合和动态可视化提供了可能。数字孪生可以帮助监测和控制采后食品在冷链各环节过程中未知的质量演变，数字孪生与其他新兴技术的结合有助于实时监测并采取措施应对供应链中影响新鲜农产品质量的潜在问题，甚至还可以对整链能耗和碳排放进行实时监测。所以，数字孪生技术可以大大提高冷链各种信息的透明度，实现相关人员共享冷链信息，提高整链的管理运营效率，减少能源的使用和质量损失，从而减少实际碳排放。此外，LCA 法的碳排放核算理论也可以与数字孪生技术完美地结合，从而提供更多有用的冷链信息。但目前有关数字孪生技术应用于食品冷链温湿度的研究较少，如 Defraeye 等[94]仅仅只实现了用离线数据追踪芒果的热历史，然后评估了食品冷链各阶段的质量损失和剩余质量。Shoji 等[95]应用数字孪生技术和相关模型可视化了四种果蔬的冷链过程质量损失，但相对湿度值只是靠估计获得，且只模拟了冷链部分环节。因此，该研究并未充分发挥数字孪生技术的作用。最后，当前数字孪生技术用于食品冷链全过程能耗监测的研究未见报道。

6 展　望

食品冷链的能源消耗和温室气体排放对自然环境产生了不可忽视的影响，所以食品冷链准确的能耗分析、合理的能效评估以及精准的碳排放核算对于增强对冷链的了解以及成本的控制都十分关键。此外，食品冷链的碳排放核算还可为发现关键排放环节、优化整链结构、定量减排责任提供一定依据，因而能效水平和总碳排放量成为了评价食品冷链可持续性的重要指标。虽然现有大量可参考的能效评估指标和碳排放的计算模型，但都难以实现食品冷链中食品质量损失的实时可知和能耗与碳排放的精准可控。系统、全面、综合、实际的食品冷链能效评估指标体系研究较为不足，能耗折算方法也并不统一。同时，仍需更多的研究投入到能耗折算标准、碳排放折算标准的改良中去，提高其适用性和真实性，并最终统一折算标准，搭建起能耗与碳排放互通互算的桥梁。

2021 年 10 月 14 日，习近平总书记在第二届联合国全球可持续交通大会开幕式上强调，要大力发展智慧交通和智慧物流，推动大数据、互联网、人工智能、区块链等新技术与交通行业深度融合，使人享其行、物畅其流，并加快形成绿色低碳的交通运输方式。“智慧物流”“智慧供应链”“智慧农业”等关键词也逐渐火热起来。随着智能环境监测、磁场协助冻结、数字孪生、人工智能等技术的发展，新兴的节能减排方法也逐渐被人们发现、挖掘出来。今后，食品冷链应更加关注智能化、数字化、高效化，以及绿色化的转型升级。

利益冲突声明：本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献：

[1] United Nations Environment Programme. UNEP food waste index report 2021[R/OL]. [2021-03-04]. https://www.unep.org/resources/report/unep-food-waste-index-report-2021.

[2] Food and Agriculture Organization of the United Nations. The state of food and agriculture 2019. Moving forward on food loss and waste reduction[EB/OL]. https://www.fao. org/policy-support/tools-and-publications/resources-details/en/c/1242090/.

[3] MERCIER S, VILLENEUVE S, MONDOR M, et al. Time-temperature management along the food cold chain: A review of recent developments[J]. Comprehensive reviews in food science and food safety, 2017, 16(4): 647-667.

[4] KISSINGER M, TUVIA-ALKALAI S, SHALOM Y, et al. Characterization of physiological and biochemical factors associated with postharvest water loss in ripe pepper fruit during storage[J]. Journal of the American society for horticultural science, 2005, 130(5): 735-741.

[5] SARR J, JEAN-LUC D, GUILPART J, 等. 全球食品冷链碳足迹分析[J]. 制冷技术, 2021, 41(4): 82-87.
SARR J, DUPONT J, GUILPART J, et al. Carbon footprint analysis of global food cold chain[J]. Chinese journal of refrigeration technology, 2021, 41(4): 82-87.

[6] International Institute of Refrigeration. The role of refrigeration in worldwide nutrition[EB/OL]. [2020-03-26]. http://dx.doi.org/10.18462/iir.INfood06.03.2020.

[7] KITINOJA L. PEF White Paper: Use of cold chains for reducing food losses in developing countries[R/OL]. Pine-La, Oregon, USA: The Postharvest Education Foundation, 2013, No. 13-03. http://www.postharvest.org/cold_chains_pef_white_paper_13_03.pdf.

[8] COULOMB D. Refrigeration and cold chain serving the global food industry and creating a better future: Two key IIR challenges for improved health and environment[J]. Trends in food science & technology, 2008, 19(8): 413-417.

[9] DONG Y B, MILLER S A. Assessing the lifecycle greenhouse gas (GHG) emissions of perishable food products delivered by the cold chain in China[J]. Journal of cleaner production, 2021, 303: ID 126982.

[10] USUBIAGA-LIAÑO A, BEHRENS P, DAIOGLOU V. Energy use in the global food system[J]. Journal of industrial ecology, 2020, 24(4): 830-840.

[11] WANG L Y, ZHAO L, MAO G Z, et al. Way to accomplish low carbon development transformation: A bibliometric analysis during 1995-2014[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2017, 68: 57-69.

[12] MARCHI B, BETTONI L, ZANONI S. Assessment of energy efficiency measures in food cold supply chains: A dairy industry case study[J]. Energies, 2022, 15(19): ID 6901.

[13] ODUM H T. Self-organization, transformity, and information[J]. Science, 1988, 242(4882): 1132-1139.

[14] ODUM H T. Environmental accounting: EMERGY and environmental decision making[M]. New York: Wiley, 1996.

[15] 张改景, 龙惟定, 张洁. 可再生能源可持续性评价的能值分析法研究[J]. 建筑科学, 2010, 26(10): 181-186.
ZHANG G J, LONG W D, ZHANG J. Study on emergy analysis method for sustainable evaluation of renewable energy[J]. Building science, 2010, 26(10): 181-186.

[16] 冯建英. 设施葡萄栽培技术效益评价研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2013.
FENG J. Evaluation on the technical benefits of the protected grape cultivation[D]. Beijing: China Agricultural University, 2013.

[17] OZKAN B, FERT C, KARADENIZ C F. Energy and cost analysis for greenhouse and open-field grape production[J]. Energy, 2007, 32(8): 1500-1504.

[18] WEI X M, CHEN B, QU Y H, et al. Emergy analysis for 'Four in One' peach production system in Beijing[J]. Communications in nonlinear science and numerical simulation, 2009, 14(3): 946-958.

[19] 骆世明. 农业生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
LUO S M. Agroecology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001.

[20] 王红彦. 基于生命周期评价的秸秆沼气集中供气工程能值分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
WANG H Y. Emergy analysis of straw biogas project for central gas supply based on life cycle assessement[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.

[21] NEAD. National environmental accounting database V2.0[EB/OL]. http://www.emergy-nead.com/country/data.

[22] 席运官, 钦佩. 稻鸭共作有机农业模式的能值评估[J]. 应用生态学报, 2006, 17(2): 237-242.
XI Y G, QIN P. Emergy value evaluation on rice-duck organic farming mode[J]. Chinese journal of applied ecology, 2006, 17(2): 237-242.

[23] 蒋爱华, 时章明, 梅炽, 等. "电力当量折标煤"统计制度对节能减排的负面影响[J]. 统计与决策, 2009(6): 13-14.
JIANG A H, SHI Z M, MEI Z, et al. Negative impact of the statistical system of "converting electric power equivalent into standard coal" on energy conservation and emission reduction[J]. Statistics & Decision, 2009(6): 13-14.

[24] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 综合能耗计算通则: GB/T 2589-2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. General rules for calculation of the comprehensive energy consumption: GB/T 2589-2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.

[25] ZHOU X, ZHOU M H, ZHANG M. Contrastive analyses of the influence factors of interprovincial carbon emission induced by industry energy in China[J]. Natural hazards, 2016, 81(3): 1405-1433.

[26] 中电联统计与数据中心. 2020年电力统计基本数据一

览表[EB/OL]. [2021-12-09]. https://cec.org.cn/detail/index.html?3-305140.

[27] 江亿, 杨秀. 在能源分析中采用等效电方法[J]. 中国能源, 2010, 32(5): 5-11.
JIANG Y, YANG X. Electricity equivalent application in energy analysis[J]. Energy of China, 2010, 32(5): 5-11.

[28] 江亿, 刘晓华, 薛志峰, 等. 能源转换系统评价指标的研究[J]. 中国能源, 2004, 26(3): 27-31.
JIANG Y, LIU X H, XUE Z F, et al. Study on ECC index of energy conversion system[J]. Energy of China, 2004 (3): 28-32.

[29] 李妍, 习文青, 刘子嫣, 等. 能源综合服务站系统的能流分析方法与能效评估[J]. 电力建设, 2022, 43(4): 140-148.
LI Y, XI W Q, LIU Z Y, et al. Energy flow analysis method and energy efficiency evaluation of integrated energy service station system[J]. Electric power construction, 2022, 43(4): 140-148.

[30] 赵赫. 生态工业园区综合能源系统能效评估及优化模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
ZHAO H. Study on energy efficiency evaluation and optimization model of integrated energy system in eco-industrial park[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.

[31] 乔富荣. 城市公共机构运行能耗综合评价与节能潜力分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
QIAO F R. Operation energy consumption comprehensive evaluation and energy saving potential analysis in urban public institutions[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.

[32] MARCHI B, ZANONI S. Cold chain energy analysis for sustainable food and beverage supply[J]. Sustainability, 2022, 14(18): ID 11137.

[33] XIAO X Q, ZHANG X, FU Z T, et al. Energy conservation potential assessment method for table grapes supply chain[J]. Sustainability, 2018, 10(8): ID 2845.

[34] DIAZ F, VIGNATI J A, MARCHI B, et al. Effects of energy efficiency measures in the beef cold chain: A life cycle-based study[J]. Environmental and climate technologies, 2021, 25(1): 343-355.

[35] ZHANG H C, LI H. An energy factor based systematic approach to energy-saving product design[J]. CIRP annals, 2010, 59(1): 183-186.

[36] 谢小华. 完全能耗评价指标的建立及应用[J]. 炼油技术与工程, 2012, 42(9): 49-53.
XIE X H. Establishment of evaluation index of complete energy consumption and application[J]. Petroleum refinery engineering, 2012, 42(9): 49-53.

[37] 董爽, 杨慧杰, 段潍超. 基于EII的石油化工企业能效评价指标数学模型建立的研究[J]. 山东化工, 2022, 51 (15): 129-132.
DONG S, YANG H J, DUAN W C. Research on the establishment of mathematical model of energy efficiency evaluation index for petrochemical enterprises based on EII[J]. Shandong chemical industry, 2022, 51(15): 129-132.

[38] 周英明, 吴国忠, 李栋, 等. 灰色关联分析法在原油集输系统能耗评价中的应用[J]. 油气田地面工程, 2009, 28 (2): 14-15.
ZHOU Y M, WU G Z, LI D, et al. Application of grey relational analysis method in energy consumption evaluation of crude oil gathering and transportation system[J]. Oil-gasfield surface engineering, 2009, 28(2): 14-15.

[39] 冯洪庆, 杨肖曦, 刘道建, 等. 应用灰色关联理论开展炼油装置能耗星级评价的研究[J]. 化工机械, 2013, 40(6): 713-718.
FENG H Q, YANG X X, LIU D J, et al. Study on gray relation theory application in energy-consuming evaluation of refining unit[J]. Chemical engineering & machinery, 2013, 40(6): 713-718.

[40] 董超, 张亚华, 贲道春, 等. 石灰单位产品可比综合能耗评价的探讨[J]. 江苏建材, 2022(2): 1-4.
DONG C, ZHANG Y H, BEN D C, et al. Discussion on evaluation of comparable comprehensive energy consumption of lime unit product[J]. Jiangsu building materials, 2022(2): 1-4.

[41] 计军平, 马晓明. 碳足迹的概念和核算方法研究进展[J]. 生态经济, 2011, 27(4): 76-80.
JI J P, MA X M. Review of carbon footprint: Definitions and accounting methods[J]. Ecological economy, 2011, 27 (4): 76-80.

[42] 翟超颖, 龚晨. 碳足迹研究与应用现状:一个文献综述[J]. 海南金融, 2022(5): 39-50.
ZHAI C Y, GONG C. Research and application of carbon footprint: A literature review[J]. Hainan finance, 2022(5): 39-50.

[43] JACOBSON M Z. 100% clean, renewable energy and storage for everything[M/OL].New York: Cambridge University Press, [2023-01-05]. https://web.stanford.edu/group/efmh/jacobson/WWSBook/WWSBook.html

[44] 田长青, 孔繁臣, 张海南. 冷链碳减排技术途径及成效测算[J]. 制冷与空调, 2022, 22(3): 72-77.
TIAN C Q, KONG F C, ZHANG H N. Technical approach and estimation of cold chain carbon emission reduction[J]. Refrigeration and air-conditioning, 2022, 22 (3): 72-77.

[45] 刘晃, 车轩. 中国水产养殖二氧化碳排放量估算的初步研究[J]. 南方水产, 2010, 6(4): 77-80.
LIU H, CHE X. Elementary study on evaluation of CO_2 emissions from aquaculture in China[J]. South China fisheries science, 2010, 6(4): 77-80.

[46] 金书秦, 陈洁. 我国水产养殖的直接能耗及碳排放研究[J]. 中国渔业经济, 2012, 30(1): 73-82.
JIN S Q, CHEN J. A study on energy consumption and carbon emission of China's aquaculture[J]. Chinese fisheries economics, 2012, 30(1): 73-82.

[47] 孙志超. 碳达峰背景下广东省班线客运企业二氧化碳排放核算方法研究[J]. 交通节能与环保, 2022, 18(5): 60-64.

SUN Z C. Research on the accounting method of CO_2 emissions for line passenger transport enterprises in Guangdong Province under the background of carbon peaking[J]. Transport energy conservation & environmental protection, 2022, 18(5): 60-64.
[48] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 温室气体排放核算与报告要求 第1部分:发电企业: GB/T 32151.1-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Requirements of the greenhouse gas emission accounting and reporting—Part 1: Power generation enterprise: GB/T 32151.1-2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
[49] 中华人民共和国生态环境部. 关于做好2022年企业温室气体排放报告管理相关重点工作的通知[EB/OL]. [2022-03-15]. https://www. mee. gov. cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202203/t20220315_971468.html.
[50] 张琦峰, 方恺, 徐明, 等. 基于投入产出分析的碳足迹研究进展[J]. 自然资源学报, 2018, 33(4): 696-708.
ZHANG Q F, FANG K, XU M, et al. Review of carbon footprint research based on input-output analysis[J]. Journal of natural resources, 2018, 33(4): 696-708.
[51] 周丁琳. 中国居民直接生活能源碳排放分析与减排路径研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
ZHOU D L. Analysis of carbon emissions from Chinese residential direct energy consumption and research on emission reduction paths[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
[52] LIU Z, GUAN D B, WEI W, et al. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China[J]. Nature, 2015, 524(7565): 335-338.
[53] 付伟, 罗明灿, 陈建成. 碳足迹及其影响因素研究进展与展望[J]. 林业经济, 2021, 43(8): 39-49.
FU W, LUO M C, CHEN J C. Research progress and prospects of carbon footprint and its influencing factors[J]. Forestry economics, 2021, 43(8): 39-49.
[54] JENSEN A A, HOFFMAN L, MOLLER B T, et al. Life cycle assessment—A guide to approaches, experiences and information sources[R]. Environmental Issues Series No. 6. Copenhagen: European Environmental Agency, 1997.
[55] KLÖPFFER W. Life cycle assessment[J]. Environmental science and pollution research, 1997, 4(4): 223-228.
[56] HELLWEG S, MILÀ I CANALS L. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment[J]. Science, 2014, 344(6188): 1109-1113.
[57] International Organization for Standardization. Environmental management-life-cycle assessment-principles and framework: ISO 14040-2006[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2006.
[58] 黄娜, 王洪涛, 范辞冬, 等. 基于不确定度和敏感度分析的LCA数据质量评估与控制方法[J]. 环境科学学报, 2012, 32(6): 1529-1536.
HUANG N, WANG H T, FAN C D, et al. LCA data quality assessment and control based on uncertainty and sensitivity analysis[J]. Acta scientiae circumstantiae, 2012, 32 (6): 1529-1536.
[59] BAMBER N, TURNER I, ARULNATHAN V, et al. Comparing sources and analysis of uncertainty in consequential and attributional life cycle assessment: Review of current practice and recommendations[J]. The international journal of life cycle assessment, 2020, 25(1): 168-180.
[60] MAHMOOD A, VARABUNTOONVIT V, MUNGKALASIRI J, et al. A tier-wise method for evaluating uncertainty in life cycle assessment[J]. Sustainability, 2022, 14(20): ID 13400.
[61] BJÖRKLUND A E. Survey of approaches to improve reliability in lca[J]. The international journal of life cycle assessment, 2002, 7(2): 64-72.
[62] VAN STAPPEN F, MATHOT M, LORIERS A, et al. Sensitive parameters in local agricultural life cycle assessments: The illustrative case of cereal production in Wallonia, Belgium[J]. The international journal of life cycle assessment, 2018, 23(2): 225-250.
[63] STOESSEL F, JURASKE R, PFISTER S, et al. Life cycle inventory and carbon and water FoodPrint of fruits and vegetables: Application to a Swiss retailer[J]. Environmental science & technology, 2012, 46(6): 3253-3262.
[64] WU W T, BERETTA C, CRONJE P, et al. Environmental trade-offs in fresh-fruit cold chains by combining virtual cold chains with life cycle assessment[J]. Applied energy, 2019, 254: ID 113586.
[65] 陈静, 王姗, 欧灿英, 等. 生鲜肉类食品供应链碳排放测算及动态优化研究[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(6): 165-182.
CHEN J, WANG S, OU C Y, et al. Study on carbon emission measurement and dynamic optimization of fresh meat supply chain[J]. Journal of China agricultural university, 2020, 25(6): 165-182.
[66] 蔡依平, 张文娟, 张世翔, 等. 基于生命周期评估的冷链物流碳足迹计算[J]. 物流技术, 2015, 34(1): 120-123, 130.
CAI Y P, ZHANG W J, ZHANG S X, et al. Calculation of carbon footprint of cold chain logistics based on life circle assessment[J]. Logistics technology, 2015, 34(1): 120-123, 130.
[67] 缪小红, 周新年, 倪川, 等. 基于生命周期法的生鲜农产品供应链碳足迹分析[J]. 兰州文理学院学报(自然科学版), 2021, 35(1): 24-29.
MIAO X H, ZHOU X N, NI C, et al. Comparative analysis of carbon footprint of fresh agricultural products based on LCA[J]. Journal of Lanzhou university of arts and science (natural science), 2021, 35(1): 24-29.
[68] 刘广海, 吴俊章, 游力, 等. 冷链物流系统碳足迹模型构建与实证分析[J]. 制冷学报, 2018, 39(4): 19-25.
LIU G H, WU J Z, YOU L, et al. Carbon footprint of cold chain system and a case analysis[J]. Journal of refrigeration, 2018, 39(4): 19-25.

[69] LEONTIEF W W. Quantitative input and output relations in the economic systems of the United States[J]. The review of economics and statistics, 1936, 18(3): ID 105.

[70] LENZEN M. Errors in conventional and input-output—Based life—Cycle inventories[J]. Journal of industrial ecology, 2000, 4(4): 127-148.

[71] MINX J, PETERS G, WIEDMANN T, et al. GHG emissions in the global supply chain of food products[C]// International Input-Output Meeting on Managing the Environment. Seville, Spain: International Input-Output Association, 2008.

[72] TANTIWATTHANAPHANICH T, SHAO X, HUANG L Q, et al. Evaluating carbon footprint embodied in Japanese food consumption based on global supply chain[J]. Structural change and economic dynamics, 2022, 63: 56-65.

[73] CAMANZI L, ALIKADIC A, COMPAGNONI L, et al. The impact of greenhouse gas emissions in the EU food chain: A quantitative and economic assessment using an environmentally extended input-output approach[J]. Journal of cleaner production, 2017, 157: 168-176.

[74] MINX J C, WIEDMANN T, WOOD R, et al. Input – output analysis and carbon footprinting: An overview of applications[J]. Economic systems research, 2009, 21(3): 187-216.

[75] BULLARD C W, PENNER P S, PILATI D A. Net energy analysis[J]. Resources and energy, 1978, 1(3): 267-313.

[76] 王长波, 张力小, 庞明月 . 生命周期评价方法研究综述——兼论混合生命周期评价的发展与应用[J]. 自然资源学报, 2015, 30(7): 1232-1242.
WANG C B, ZHANG L X, PANG M Y. A review on hybrid life cycle assessment: Development and application[J]. Journal of natural resources, 2015, 30(7): 1232-1242.

[77] SUH S, HUPPES G. Methods for life cycle inventory of a product[J]. Journal of cleaner production, 2005, 13(7): 687-697.

[78] YANG Y, HEIJUNGS R, BRANDÃO M. Hybrid life cycle assessment (LCA) does not necessarily yield more accurate results than process-based LCA[J]. Journal of cleaner production, 2017, 150: 237-242.

[79] POMPONI F, LENZEN M. Hybrid life cycle assessment (LCA) will likely yield more accurate results than process-based LCA[J]. Journal of cleaner production, 2018, 176: 210-215.

[80] PERKINS J, SUH S. Uncertainty implications of hybrid approach in LCA: Precision versus accuracy[J]. Environmental science & technology, 2019, 53(7): 3681-3688.

[81] DONG Y B, MILLER S A, KEOLEIAN G A. Estimating the greenhouse gas emissions of cold chain infrastructure in China from 2021 to 2060[J]. Sustainable production and consumption, 2022, 31: 546-556.

[82] 李斌, 刘斌, 陈爱强, 等 . 基于冷链模式的某果蔬碳足迹计算[J]. 制冷学报, 2021, 42(2): 158-166.
LI B, LIU B, CHEN A Q, et al. Calculation of carbon footprint of fruits and vegetables based on cold chain model[J]. Journal of refrigeration, 2021, 42(2): 158-166.

[83] HANNAH R, MAX R. "Environmental Impacts of Food Production"[EB/OL]. [2022-12-01]. https://ourworldindata.org/environmental-impacts-of-food.

[84] 许茹楠, 刘斌, 陈爱强, 等 . 我国果蔬冷链碳足迹分析[J]. 制冷学报, 2018, 39(4): 13-18, 25.
XU R N, LIU B, CHEN A Q, et al. Analysis of cold chain carbon footprint of fruits and vegetables in China[J]. Journal of refrigeration, 2018, 39(4): 13-18, 25.

[85] 李斌, 刘斌, 陈爱强, 等 . 基于冷链模式的农产品冷链碳足迹计算[J]. 冷藏技术, 2019, 42(3): 1-5.
LI B, LIU B, CHEN A Q, et al. Calculation of carbon footprint of agricultural products based on the model of cold chain[J]. Journal of refrigeration technology, 2019, 42(3): 1-5.

[86] 康友才 . 仓储系统低碳性的综合评价体系研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
KANG Y C. Research on low-carbon comprehensive evluation setup of storage system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.

[87] 付淑娥, 郭岳达 . 空调制冷剂与全球气候变暖[J]. 生态经济, 2022, 38(12): 5-8.
FU S E, GUO Y D. Air conditioning refrigerant and global warming[J]. Ecological economy, 2022, 38(12): 5-8.

[88] 高浩然, 张玉林, 张顺顺 . 考虑时效性和品质性满意度约束的易腐品冷链物流配送研究[J/OL]. 控制与决策:1-10. https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0998.
GAO H R, ZHANG Y L, ZHANG S S. Research on cold chain logistics distribution of perishable products considering timeliness and quality customer satisfaction[J/OL]. Control and decision: 1-10. https://doi. org/10.13195/j.kzyjc.2022.0998.

[89] 刘思远, 陈天恩, 陈栋, 等 . 时变多车型下的生鲜农产品配送路径优化模型[J]. 智慧农业(中英文), 2021, 3(3): 139-151.
LIU S Y, CHEN T E, CHEN D, et al. Time-varying heterotypic-vehicle cold chain logistics distribution path optimization model[J]. Smart agriculture, 2021, 3(3): 139-151.

[90] 冯杰, 史立 . 生鲜产品的纯电动冷藏车配送路径问题研究[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(9): 237-242.
FENG J, SHI L. Research on vehicle routing problem of fresh products with pure electric refrigerator truck[J]. Computer engineering and applications, 2019, 55(9): 237-242.

[91] SHA Y S, HUA W S, CAO H F, et al. Properties and encapsulation forms of phase change material and various types of cold storage box for cold chain logistics: A review[J]. Journal of energy storage, 2022, 55: ID 105426.

[92] LIU M, SAMAN W, BRUNO F. Computer simulation with TRNSYS for a mobile refrigeration system incorporating a phase change thermal storage unit[J]. Applied energy, 2014, 132: 226-235.

[93] 刘广海, 马平川, 李庆庭, 等 . 冷链专用蓄冷托盘设计与控温运输性能测试[J]. 农业工程学报, 2021, 37(16):

295-302.
LIU G H, MA P C, LI Q T, et al. Design of special cold chain pallet and its temperature-controlled transport performance test[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2021, 37(16): 295-302.
[94] DEFRAEYE T, TAGLIAVINI G, WU W T, et al. Digital twins probe into food cooling and biochemical quality changes for reducing losses in refrigerated supply chains[J]. Resources, conservation and recycling, 2019, 149: 778-794.
[95] SHOJI K, SCHUDEL S, ONWUDE D, et al. Mapping the postharvest life of imported fruits from packhouse to retail stores using physics-based digital twins[J]. Resources, conservation and recycling, 2022, 176: ID 105914.

Review on Energy Efficiency Assessment and Carbon Emission Accounting of Food Cold Chain

WANG Xiang, ZOU Jingui, LI You, SUN Yun, ZHANG Xiaoshuan*

(*Beijing Laboratory of Food Quality and Safety*, *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: The global energy is increasingly tight, and the global temperature is gradually rising. Energy efficiency assessment and carbon emission accounting can provide theoretical tools and practical support for the formulation of energy conservation and emission reduction strategies for the food cold chain, and is also a prerequisite for the sustainable development of the food cold chain. In this paper, the relationship and differences between energy consumption and carbon emissions in the general food cold chain are first described, and the principle, advantages and disadvantages of three energy consumption conversion standards of solar emergy value, standard coal and equivalent electricity are discussed. Besides, the possibilities of applying these three energy consumption conversion standards to energy consumption analysis and energy efficiency evaluation of food cold chain are explored. Then, for a batch of fresh agricultural products, the energy consumption of six links of the food cold chain, including the first transportation, the manufacturer, the second transportation, the distribution center, the third transportation, and the retailer, are systematically and comprehensively analyzed from the product level, and the comprehensive energy consumption level of the food cold chain are obtained. On this basis, ten energy efficiency indicators from five aspects of macro energy efficiency are proposed, including micro energy efficiency, energy economy, environmental energy efficiency and comprehensive energy efficiency, and constructs the energy efficiency evaluation index system of food cold chain. At the same time, other energy efficiency evaluation indicators and methods are also summarized. In addition, the standard of carbon emission conversion of food cold chain, namely carbon dioxide equivalent is introduce, the boundary of carbon emission accounting is determined, and the carbon emission factors of China's electricity is mainly discussed. Furthermore, the origin, principle, advantages and disadvantages of the emission factor method, the life cycle assessment method, the input-output analysis method and the hybrid life cycle assessment method, and the basic process of life cycle assessment method in the calculation of food cold chain carbon footprint are also reviewed. In order to improve the energy efficiency level of the food cold chain and reduce the carbon emissions of each link of the food cold chain, energy conservation and emission reduction methods for food cold chain are proposed from five aspects: refrigerant, distribution path, energy, phase change cool storage technology and digital twin technology. Finally, the energy efficiency assessment and carbon emission accounting of the food cold chain are briefly prospected in order to provide reference for promoting the sustainable development of China's food cold chain.

Key words: food cold chain; conversion of energy consumption; energy consumption analysis; energy efficiency assessment; carbon emissions; cold chain energy conservation and emission reduction; smart supply chain